

# 金属材料韧脆转变研究进展： FATT50 的影响



刘继江<sup>1</sup>, 谭军<sup>2,\*</sup>

<sup>1</sup> 四川六合特种金属材料股份有限公司, 四川江油 621701

<sup>2</sup> 重庆大学材料科学与工程学院, 重庆 400044

**摘要:** 在低温条件下, 金属材料的韧脆转变行为对工程结构的安全性至关重要。这种转变导致裂纹迅速扩展, 很可能造成事故。通过对 Web of Science 数据库的检索和分析, 发现韧脆转变的研究自 1990 年以来呈现出明显的增长趋势, 国际合作日益频繁, 以中国、美国、日本等国为主导。关键词分析表明, 关注点主要集中在材料的力学性能、成分对韧脆转变的影响、微观结构、温度等方面。本文聚焦于 FATT50 (Fracture Appearance Transition Temperature at 50% Fracture Probability, 50%断裂概率下的断口形貌转变温度), 并对国内外的 FATT50 评定标准进行了综合梳理, 深入分析了 FATT50 与材料化学成分、微观结构以及热处理工艺等关键因素之间的相互关系。研究发现, FATT50 受到这些因素的共同影响, 特别是在化学成分、微合金化元素和杂质的控制方面, 可以明显改善金属的低温脆性, 进而影响 FATT50 温度。微观结构的变化可能导致金属在低温条件下的脆性增加。此外, 热处理工艺的选择也对 FATT50 产生显著影响, 通过调整温度和时间, 可以有效改善或恶化金属在低温下的性能。这一研究为理解和优化金属材料在低温条件下的性能提供参考, 为工程实践和材料设计提供了重要指导。

**关键词:** 化学成分; 微观结构; 热处理; 韧脆转变温度; FATT50

**DOI:** 10.57237/j.mater.2023.06.001

## Research Progress on the Ductile-to-Brittle Transition of Metal Materials: The Impact of FATT50

Jijiang Liu<sup>1</sup>, Jun Tan<sup>2,\*</sup>

<sup>1</sup> Sichuan Liuhe Special Metal Materials Co., Ltd, Jiangyou, 621701, China

<sup>2</sup> College of Materials Science and Engineering, Chongqing University, Chongqing, 400044, China

**Abstract:** In low-temperature conditions, the ductile-to-brittle transition behavior of metal materials is crucial for the safety of engineering structures. This transition leads to the rapid expansion of cracks and could potentially result in accidents. Through retrieval and analysis of the Web of Science database, it was found that research on ductile brittle transition has shown a significant growth trend since 1990, with increasing international collaboration, primarily led by countries such as China, the United States, and Japan. Keyword analysis indicates a primary focus on aspects such as the mechanical properties of materials, the impact of composition on ductility and brittleness, microstructure, and temperature. This paper focuses on FATT50 (Fracture Appearance Transition Temperature at 50% Fracture Probability),

基金项目: 中央高校基本科研业务费 (No. 2021CDJQY-040).

\*通信作者: 谭军, jun.tan@cqu.edu.cn

收稿日期: 2023-11-20; 接受日期: 2023-12-27; 在线出版日期: 2024-01-20

<http://www.materialsrd.com>

comprehensively reviewing domestic and international standards for FATT50. It deeply analyzes the interrelationships between FATT50 and key factors such as material chemical composition, microstructure, and heat treatment. The study reveals that FATT50 is influenced by these factors collectively, especially in terms of chemical composition, microalloying elements, and impurities, which can significantly improve the low-temperature brittleness of metals and subsequently affecting the FATT50 temperature. Changes in microstructure may lead to increased brittleness of metals at low temperatures. Furthermore, the choice of heat treatment process also has a significant impact on FATT50, and adjustments in temperature and time can effectively improve or exacerbate the performance of metals at low temperatures. This research provides valuable insights for understanding and optimizing the performance of metal materials under low-temperature conditions, offering important guidance for engineering practices and materials design.

**Keywords:** Chemical Composition; Microstructure; Heat Treatment; Ductile-Brittle Transition Temperature; FATT50

## 1 引言

在低温条件下, 某些金属材料容易发生脆变, 裂纹的扩展速度极快, 达到 1000~3000m/s, 目前尚无法有效阻止其扩展[1]。这种脆变往往没有任何预警, 例如 1938 年和 1940 年, 比利时的哈塞尔特城和海伦赛贝斯城先后发生了两起钢桥坍塌事故。经过研究, 这些事故都是因为材料的冷脆性导致的。又如 1912 年最为豪华、号称永不沉没的 Titanic 号在首次航行中沉没于冰海, 成为了 20 世纪令人难以忘怀的海难。这起事故的原因也是因为采用了含硫量高的钢板, 韧性很差, 特别是在低温条件下表现更为脆性[2]。另外, 1954 年冬天, 在爱尔兰寒风凛冽的海面上航行的英国 32000 吨的“世界协和号”油船, 也突然发生了船体中部断裂并沉没的事件[3]。其原因是同样由于材料的冷脆性。

在特定的温度  $t_k$  下, 材料的韧性会转变为脆性, 其冲击功会显著降低[4, 5]。此时, 断裂机制会由微孔聚集转变为穿晶解理断裂, 断口形貌也会由纤维状变为结晶状。这种变化的本质是材料塑性变形能力对温度变化的反映。低温脆性断裂包括穿晶脆断和沿晶界的晶间脆断两种断裂方式。其中, 穿晶脆断主要表现为解理断裂, 而大多数低温脆性断裂都是沿解理面的穿晶断裂。晶间脆断通常发生在应力腐蚀或回火脆性的情况下。

基于 Web of Science Core Collection (1900-至今) 数据库, 检索主题 (Topic, 包括题目、摘要和关键词) “ductile brittle transition”, 文献类型为 Article 和 Review, 检索出 8341 篇文献。由图 1(a)所示, 根据每年的研究型和综述进行统计, 基于韧脆转变方面的研究大体分为三个阶段: (I) 1990 年之前研究较少, 处于研究的初始阶段, 在 1955 年至 1990 年近半个世纪仅有 222 篇,

占 8341 篇中的 2.66%, 每年平均仅有 6 篇左右; (II) 1991-2005 年进入稳定发展期间, 15 年期间共发表 2304 篇, 平均每年发表近 154 篇; (III) 2006 年至今近 20 年的发展进入快速增长阶段, 发表高水平论文 5814 篇, 平均每年发表高达 323 篇, 并且这个数据由 2006 年的 168 篇快速增长到 569 篇 (2021 年)。进一步统计了发表的期刊, 发现前十位的期刊共发表 1913 篇, 占 22.9%。前 2 名分别是 MATERIALS SCIENCE AND ENGINEERING A 和 JOURNAL OF NUCLEAR MATERIALS, 分别发表了 376 和 310 篇论文 (研究型 and 综述论文)。

将 Web of Science 导出的全字段使用 VOSviewer 1.6.20 进行进一步分析[6]。图 2 是按照国家或地区统计的韧脆转变研究可视化图, 在统计的 108 个国家中, 65 个国家的论文大于或等于 5 篇, 其中圆圈的大小表示发表的论文相对数量。不难看出, 中国、美国、日本、德国和法国研究数量最多, 分别占总数的 27.16%、22.59%、9.52%、7.65%和 7.18%。国家之间的曲线数量代表存在合作论文的数目, 可见国际合作普遍存在, 且中国、美国、日本存在大量的共同研究成果。其中的颜色表示发表的时间与平均值的差再除以标准差, 重点关注值在(-1,1)之间, 可以看出美国、日本、英格兰等国研究在负值部分, 表示这些国家的研究较早, 处于研究的第(I)和第(II)阶段。而中国、巴基斯坦、沙特阿拉伯、罗马尼亚等国处于(0.5-1.0)区间, 说明目前研究较为活跃。

关键词是文章中高度凝练的要点, 能够从根本上反映文章的主要内容。关键词出现的频率越高, 说明其在该研究领域中的地位越重要。基于 VOSviewer 软

件可视化分析“ductile brittle transition”研究中的关键词，8341 篇高水平论文中共有 22984 个关键词，其中频次出现 100 次以上的关键词共有 65 个，如图 3 所示。出现频次最高的关键词(出现频次超过 130 次的关键词)汇总在表 1 中。由此可以看出：

(1) 关键词主要集中在材料的力学性能方面，如 Brittle-Ductile Transition [7-13]、Mechanical Properties [14-18]、Deformation [19-24]、Fracture [25-30]、Toughness [31-34]、Strength [33, 35-39]、Brittle [40-45]、Plasticity [46-51]等；

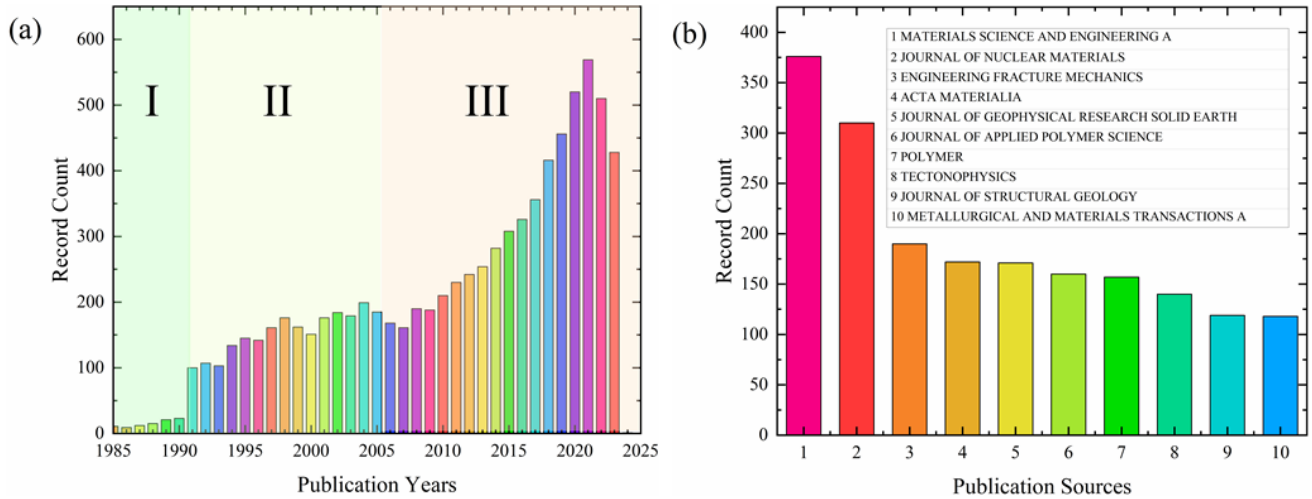


图 1 韧脆转变方面的研究和综述论文概述。(a) 1985 年至今每年的发表论文数量；(b) 前 10 位发表论文最多的期刊

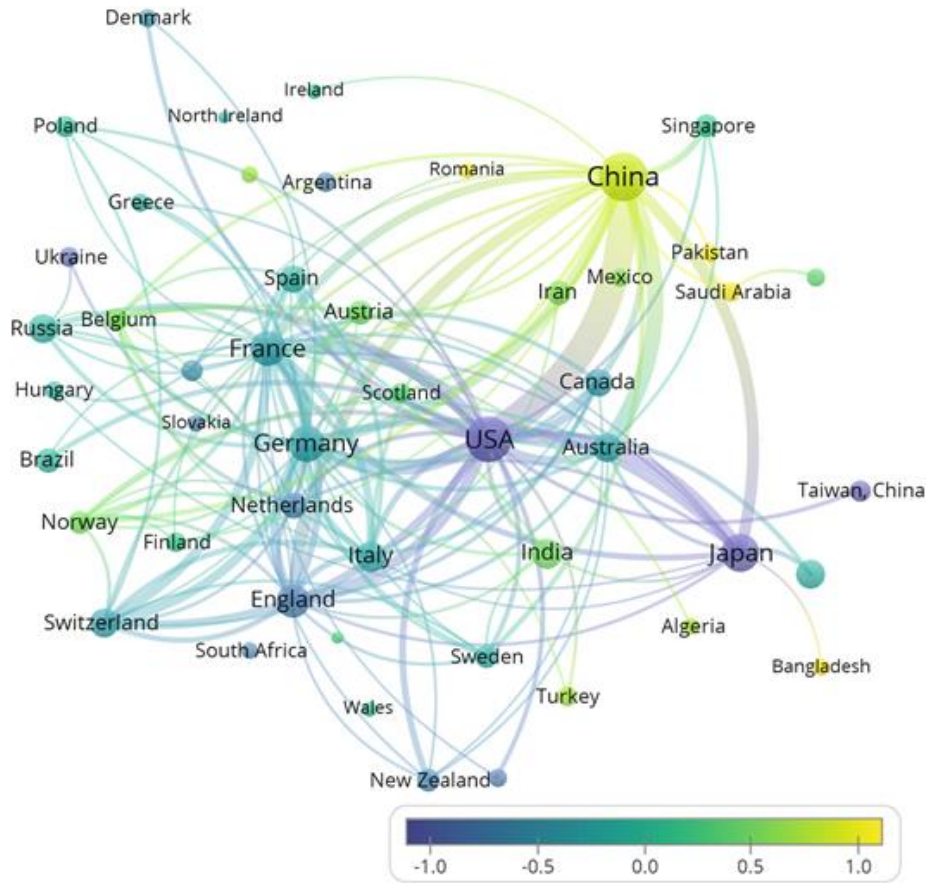


图 2 按照国家或地区统计的韧脆转变研究可视化网络图





| Keywords            | Occurrences | Total link strength |
|---------------------|-------------|---------------------|
| Cleavage Fracture   | 191         | 493                 |
| Damage              | 186         | 470                 |
| Ductility           | 185         | 519                 |
| Simulation          | 176         | 442                 |
| Blends              | 175         | 452                 |
| Tensile Properties  | 175         | 511                 |
| Flow                | 167         | 405                 |
| Creep               | 166         | 398                 |
| Elastic Properties  | 163         | 282                 |
| Growth              | 163         | 417                 |
| Plastic-Deformation | 163         | 387                 |
| Hardness            | 160         | 405                 |
| Single-Crystals     | 157         | 483                 |
| Polymer Blends      | 154         | 373                 |
| Steel               | 153         | 429                 |
| Polymers            | 151         | 337                 |
| Tungsten            | 147         | 438                 |
| Rheology            | 142         | 269                 |
| Energy              | 140         | 368                 |
| Strain-Rate         | 132         | 437                 |
| Metals              | 130         | 398                 |
| Size                | 130         | 402                 |

金属材料在温度降低时，由韧性状态转变为脆性状态的温度被称为韧脆转变温度（Ductile-brittle Transition Temperature, DBTT）。FATT（Fracture Appearance Transition Temperature, 断口形貌转变温度）

主要关注金属的特性，特别是在低温条件下，它表示金属在不同温度下断口外观和性质的变化点。在高于 FATT 的温度下，金属表现出韧性断裂的特征。图 4 为典型的铁素体钢冲击能量转变曲线（实线）和断口形貌转变曲线（虚线）[95]。韧脆转变温度（DBTT）适用于各种材料，而不仅仅局限于金属。它表示材料在不同温度下从韧性到脆性的转变点，涉及到材料整体性能的改变。韧脆转变温度受到材料结构、组成和处理方式等多方面因素的影响。几乎所有具有体心立方晶格和密排六方晶格的金属材料都会经历一个由韧性状态向脆性状态转变的温度点。在工程应用中，将断口形貌中韧性和脆性面积各占 50% 时对应的试验温度称为断口形貌转变温度，即 FATT50（Fracture Appearance Transition Temperature at 50% Fracture Probability, 50% 断裂概率下的断口形貌转变温度）。FATT50 会受到材料化学成分、微量元素、微观组织、冶金工艺、锻造工艺、热处理工艺等因素的影响，因此它是我们分析和判断材料工艺和质量水平的有力工具，也是材料设计和选用中的一项重要性能参数。在航空航天、核电、石化等领域，FATT50 常常被用于关键零部件的质量控制。

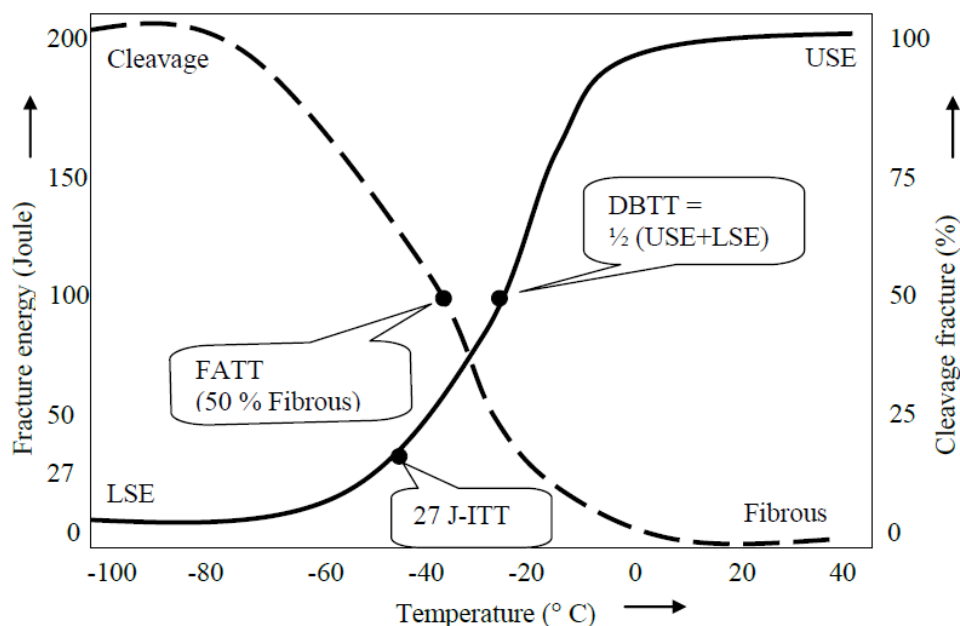


图 4 典型的铁素体钢冲击能量转变曲线（实线）和断口形貌转变曲线（虚线）。USE 代表冲击断裂的“上层能量”图中标示了不同的韧脆转变温度，如 27 J-ITT（对应于吸收 27 焦耳冲击能量的温度）、FATT 和 DBTT [95]

本文以 FATT50 这一重要的特征参数为研究对象，综述了国内外对 FATT50 评定标准，分析了 FATT50 与材料的微观结构、化学成分、热处理工艺等因素的关系。

## 2 国内外对 FATT50 评定标准

FATT50 的研究始于 20 世纪 50 年代，早期主要针

对钢铁材料, 后来扩展到铝合金、镁合金、钛合金等材料[96]。目前, FATT50 已成为材料性能评估和质量控制中的重要指标, 各国标准也对 FATT50 的要求越来越高。各国对 FATT50 的要求和评定标准因材料和行业的不同而异, 下面列举一些主要的标准和要求。

**美国标准:** 根据 ASTM A370 标准[97], 要求在钢铁材料的低温冲击试验中, FATT50 不能高于指定的最低试验温度。另外, 根据美国核电站标准, 钢材的 FATT50 应大于或等于 $-40^{\circ}\text{C}$  [98]。

**欧洲标准:** 根据 EN10045-1 标准[99], 要求在钢铁材料的低温冲击试验中, FATT50 不能高于指定的最低试验温度[100]。

**日本标准:** 根据 JIS G 0801 标准[101], 要求在钢铁材料的低温冲击试验中, FATT50 不能高于指定的最低试验温度。根据 JIS G 3110 标准, 铝合金材料的 FATT50 应大于或等于 $-40^{\circ}\text{C}$  [102]。

**中国标准:** 根据 GB/T 229-2020 标准[103], 要求在钢铁材料的低温冲击试验中, FATT50 不能高于指定的最低试验温度。另外, 根据不同行业和用途, 如钢材领域、航空航天领域、石化领域等, 对 FATT50 的要求也不同[104]。

- 1) 钢材领域: 在中国, 钢材领域使用 FATT50 指标较多, 常用于低温容器、锅炉和管道等关键零部件的质量控制。例如, 中国标准 GB/T 1220-2007 对不锈钢的 FATT50 要求为 $-20^{\circ}\text{C}$  时不低于 20J [105]。
- 2) 航空航天领域: 在航空航天领域, FATT50 也是一项重要的验收指标。例如, 中国航空材料规范 GB/T 3077-2015 要求超高强度钢材在 $-60^{\circ}\text{C}$  或更低温度下的 FATT50 值不得低于 50 J [106, 107]。
- 3) 石化领域: 在石化领域, FATT50 通常被用于关键零部件的质量控制, 如管道、储罐、换热器等。例如, 中国标准 GB/T 5312-2017 要求石化管道钢在 $-40^{\circ}\text{C}$  或更低温度下的 FATT50 值不得低于 27J。

需要注意的是, 不同国家和行业对 FATT50 的要求和评定标准可能会存在一些差异, 具体要求需要根据实际情况进行确定。

## 2.1 化学成分与 FATT50 的关系

化学成分对 FATT50 有很大的影响[5]。高碳含量使

金属更容易在低温下变得脆性, 因为碳形成碳化物, 增加脆性。合金元素的添加可改变晶体结构, 一些元素提高韧性, 而其他元素可能导致脆性增加。杂质元素可能引起局部脆化, 降低在低温下的韧性。此外, 元素间的相互作用也会影响 FATT50, 例如在含钼不锈钢中, 钼的添加可以提高 FATT50, 但与钼形成的硫化物会对其 FATT50 产生负面影响。目前这一方面的研究还相对较少。二元和多元的影响比单一元素的影响更加复杂。

首先, 添加一些合适的合金元素可以提高材料的 FATT50。以不锈钢为例, 其中添加了一定量的镍、铬、钼等元素可以显著提高其 FATT50, 同时也提高了材料的耐腐蚀性能。这是因为这些元素的添加可以改善材料的晶格结构, 增强其晶界的结合强度和抗拉伸性能, 提高材料的韧性, 从而提高其 FATT50。

其次, 材料中含有的一些微量元素也是影响 FATT50 的重要因素。研究表明, 材料中的微量元素对 FATT50 有着不可忽视的影响, 尤其是在高强度钢、不锈钢、镁合金等材料中。微量元素可以改变材料的晶体结构、晶界能量和位错密度等性质, 进而影响材料的 FATT50。

碳元素是钢铁中的主要合金元素之一, 其含量对钢铁的性能影响很大[54, 56, 108]。研究表明, 碳元素对 FATT50 的影响是双重的。低碳钢可以提高 FATT50, 但当碳含量超过一定范围时, FATT50 会逐渐降低。这是因为碳元素的存在可以改变钢铁的晶体结构, 进而影响其晶界能量和位错密度。碳元素可以形成纤维状夹杂物, 进一步影响钢铁的冲击韧性。

氮元素对钢的晶体结构也有一定的影响, 这也影响着钢的 FATT50 [109]。一般来说, 当钢中氮元素含量较低时, 它对 FATT50 的影响较小, 但随着氮元素含量的增加, 其对 FATT50 的影响将逐渐增大。当钢中含有适量的氮元素时, 其可以在钢的晶界和夹杂物中析出, 从而细化晶界和夹杂物的尺寸, 提高钢的 FATT50。另外, 氮元素还可以与铁元素形成稳定的化合物, 使钢的晶粒变细, 从而提高钢的 FATT50。但是, 当氮元素含量过高时, 其会导致钢中的夹杂物增多, 晶界清洁度降低, 从而降低钢的 FATT50。

硫元素是钢中一种常见的微量杂质元素, 其含量通常在 10-150 ppm 之间。硫元素在钢中的存在对其力学性能和腐蚀性能都有一定的影响, 同时也会对钢的 FATT50 产生一定的影响。硫元素的存在会增加钢中的夹杂物含量, 从而影响钢的冲击韧性。硫化物是一种常见的夹杂物, 其大小和形状对钢的冲击韧性影响较大。



研究表明,在含硫钢中,硫化物的数量和尺寸会随着硫含量的增加而增加,从而导致钢的冲击韧性下降。此外,硫元素的存在还会影响钢的结晶过程,导致晶粒尺寸的增大,从而降低钢的冲击韧性。硫元素还会降低钢的焊接性能和腐蚀性能,对钢的全面性能产生负面影响。因此,在钢的生产和使用过程中,需要控制硫元素的含量,以提高钢的 FATT50 和全面性能。一些方法,如采用低硫铁水、采用碱性熔剂等,可以降低钢中的硫含量,提高其冲击韧性和全面性能[110, 111]。

磷元素是钢中一种常见的微量元素,其含量一般在 0.005%~0.04% 之间[112, 113]。虽然磷是一种重要的合金元素,可以提高钢的硬度和强度,但是磷对钢的 FATT50 也会产生影响。研究表明,钢中磷元素的含量对 FATT50 的影响是复杂的,具体规律如下:(1) 磷元素含量低于 0.02% 时,对 FATT50 的影响不明显,甚至可以提高 FATT50。这是因为磷元素可以促进钢中晶界的析出,形成细小的碳化物,从而增强钢的晶界结合能力,提高钢的 FATT50。(2) 磷元素含量高于 0.02% 时,对 FATT50 的影响开始显著。研究表明,磷元素会促进钢中的夹杂物形成,使得夹杂物数量和尺寸增加,从而降低钢的 FATT50。磷元素的影响还受到其他元素的影响。例如,在含铬不锈钢中,磷元素的添加可以提高钢的硬度和强度,但与钼形成的硫化物会对其 FATT50 产生负面影响。综上所述,钢中磷元素对 FATT50 的影响具有一定的复杂性,其影响取决于磷元素的含量、钢的成分和微观结构等多种因素。因此,在钢材的生产和使用过程中,需要合理控制磷元素的含量,以保证钢材具有良好的冲击韧性。

氧元素是钢中一种常见的微量元素,其含量通常在几百至几千 ppm 之间。虽然氧元素含量较低,但它对钢的 FATT50 也有着重要的影响[114]。关于氧元素对钢的 FATT50 的影响,研究结果并不一致。一般来说,氧元素含量越低,钢的 FATT50 越高,因为氧元素会促进氢的吸附和扩散,进而降低钢的 FATT50。研究表明,钢中的氧元素会影响钢的强度和韧性。在一定范围内,钢中的氧元素含量升高,钢的强度也会提高,但其韧性会降低。随着氧元素含量的继续升高,钢的强度会继续提高,但其韧性则会逐渐恢复甚至提高。一些研究表明,氧元素含量升高会降低钢的 FATT50,因为氧元素会导致钢中的晶界脆化。而另一些研究则表明,氧元素含量升高可以提高钢的 FATT50,因为氧元素可以促进钢中的铁素体相变,从而使其晶粒细化,提高韧性。氧元素主要通过以下两种途径影响钢的 FATT50:

(1) 影响氢的吸附和扩散。氧元素会使钢的晶界区域富集氧化物和氢化物,进而影响氢的吸附和扩散。氧化物和氢化物具有较高的自由能,因此易于吸附和扩散氢原子。此外,氧化物和氢化物也会在晶界区域形成脆性夹杂物,降低钢的冲击韧性。因此,氧元素的含量越高,钢的晶界区域就会富集更多的氧化物和氢化物,从而降低 FATT50。(2) 影响钢的晶体结构和缺陷。氧元素也会影响钢的晶体结构和缺陷,进而影响 FATT50。在钢的冷却过程中,氧元素会形成氧化物夹杂物或枝晶状氧化物,这些夹杂物或氧化物会在钢的晶界区域或内部形成缺陷,进而影响钢的冲击韧性。因此,为了提高钢的 FATT50,需要尽量降低钢中氧元素的含量。常用的方法包括采用高纯度原材料、采用真空冶炼技术、控制炉温和气氛等。

此外,元素之间的相互作用也会对材料的 FATT50 产生影响。以下是一些常见的元素之间相互作用的例子:

钼和硫:钼是提高不锈钢 FATT50 的有益元素,但是当钼与硫形成硫化物时,会对材料的 FATT50 产生负面影响[115, 116]。

镍和碳:镍的加入可以提高钢材的 FATT50,但是当钢中碳含量较高时,镍的加入会降低钢的 FATT50 [117]。

铝和硅:铝和硅是常见的杂质元素,它们的存在可以降低钢材的 FATT50,尤其是在高温条件下[118]。

磷和钙:磷是一种有害元素,会降低钢材的 FATT50。但是当钙的含量较高时,可以与磷结合形成钙磷化合物,从而减轻磷对钢材 FATT50 的负面影响[119]。

总之,化学成分是影响材料 FATT50 的重要因素之一。正确控制材料的化学成分可以提高材料的 FATT50,从而提高材料的使用寿命和安全性能。因此,在材料设计和制造过程中,需要注意控制材料的化学成分,以满足其特定的使用要求。实际上材料化学成分的变化,会直接影响材料的相组成和微观结构,因此有必要探讨微观结构对 FATT50 的影响规律。元素之间相互作用的复杂性使得确定元素对材料 FATT50 的影响并不总是简单明确的,需要进行详细的研究和分析。

## 2.2 微观结构与 FATT50 的关系

材料的微观结构对其冲击韧性有着重要的影响,也影响 FATT50 的大小。一般认为,晶粒细化可以提高

材料的冲击韧性, 而晶界、夹杂物等缺陷则会降低其冲击韧性。研究表明, 材料的晶粒尺寸与 FATT50 之间存在一定的关系。在某些情况下, 晶粒细化可以提高 FATT50, 但是在一些材料中, 晶粒尺寸与 FATT50 之间的关系并不明显。

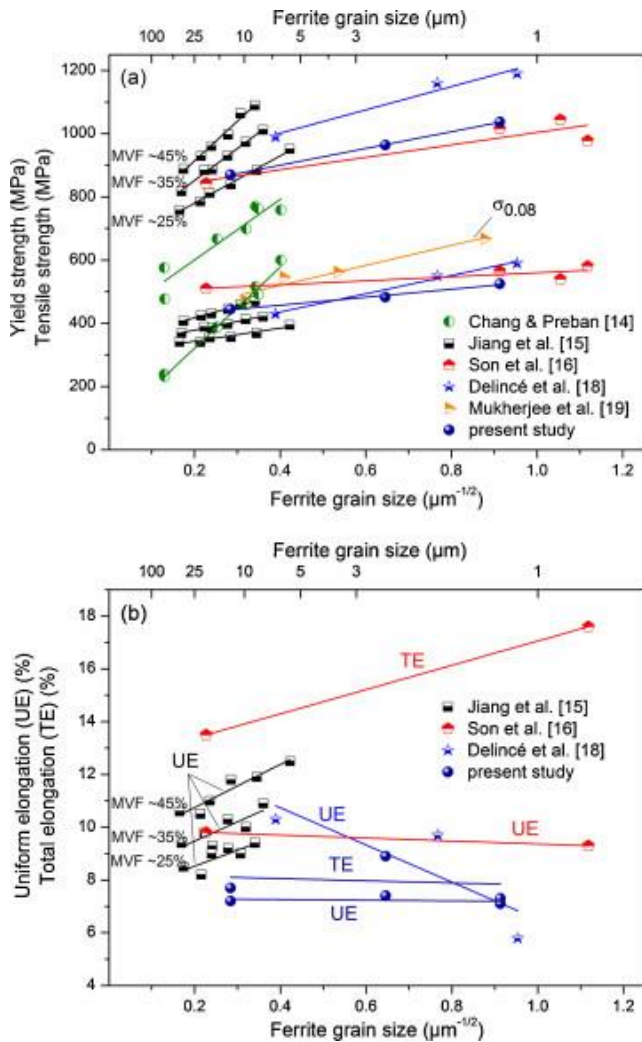


图 5 (a)屈服强度和拉伸强度以及(b)均匀伸长率和总伸长率与晶粒尺寸的关系。MVF: 马氏体体积分数;  $\sigma_{0.08}$ : 8%应变时的流动应力; UE: 均匀伸长率; TE: 总伸长率[95]

### 2.2.1 晶粒尺寸对 FATT50 的影响

晶粒尺寸是指金属材料中晶体的尺寸, 通常用平均晶粒尺寸来描述[95]。如图 5 所示, 研究表明, 晶粒尺寸对金属材料的 FATT50 有着重要的影响。晶粒细化可以提高金属材料的 FATT50, 这是因为晶粒细化可以减小材料的缺陷密度, 包括夹杂物、位错、晶界等, 从而提高材料的塑性和韧性, 进而提高其抗裂纹扩展能力。晶粒细化还可以提高金属材料的强度和硬度,

提高其耐磨性和抗疲劳性能, 进一步提高材料的 FATT50。

然而, 过度的晶粒细化可能会降低金属材料的 FATT50。这是因为过度细化的晶粒容易出现晶粒界面的应力集中和脆性断裂, 导致材料的韧性下降。此外, 过度细化的晶粒也会导致材料的位错密度增加, 增加了裂纹的扩展难度。

在金属材料中, 晶粒尺寸与 FATT50 之间的关系还受到许多其他因素的影响, 如材料的化学成分、热处理工艺等。因此, 在实际应用中, 需要综合考虑多种因素的影响, 来确定最优的材料设计和热处理工艺。

### 2.2.2 晶界夹杂对 FATT50 的影响

晶界是晶粒与晶粒之间的边界区域, 是材料微观结构中的一个重要参数。一般认为晶粒内的夹杂物对 FATT50 的影响较小, 晶界处通常会出现一些夹杂物如硫化物、氧化物、碳化物等则会成为材料中的应力集中点, 导致材料发生脆性断裂, 会降低 FATT50。因此, 在材料的生产和加工过程中, 需要采取有效的措施降低晶界和夹杂物的含量, 以提高材料的 FATT50 [95, 120]。

除了晶界的夹杂物, 材料中的孪晶也会影响其冲击韧性和 FATT50。孪晶是指晶体中一种特殊的晶界结构, 它的形成是由于晶格中的某些原子在沿某个方向移动时发生畸变。研究表明, 孪晶可以提高材料的冲击韧性和 FATT50, 但是孪晶的形成是受许多因素影响的, 包括材料的化学成分、微观结构和加工工艺等。

总之, FATT50 与材料的微观结构紧密相关。晶粒细化可以提高材料的 FATT50, 但在一些材料中, 晶粒尺寸与 FATT50 之间的关系并不明显。晶界和夹杂物等缺陷会降低材料的 FATT50, 因此在材料生产和加工中需要控制这些缺陷的含量。同时, 材料的相组成、化学成分、热处理工艺等也会对 FATT50 产生影响, 需要注意这些因素的控制和优化, 以提高材料的 FATT50 和综合性能。

## 2.3 热处理与 FATT50 的关系

FATT50 与热处理关系的研究已经有多年历史。在材料加工中, 热处理是一个非常重要的工艺, 可以通过改变材料的微观结构和化学成分来提高其性能。热处理工艺对 FATT50 的影响也备受关注。



### 2.3.1 退火

钢退火热处理是钢材经过加热到一定温度后,经过一定时间的保温后再缓慢冷却的热处理工艺。钢退火热处理对 FATT50 的影响是非常重要的。一般来说,退火处理可以提高钢材的塑性和韧性,并降低其硬度和强度。在退火处理过程中,钢材的晶体结构会发生变化,从而影响其 FATT50。一些研究表明,钢材的退火温度和退火时间对 FATT50 的影响很大。退火温度是影响钢材晶粒尺寸的重要因素,晶粒细化可以提高钢材的 FATT50。但是过高的退火温度会导致晶粒长大,从而降低钢材的 FATT50。因此,在进行退火处理时,需要根据具体情况确定适当的退火温度。此外,退火时间也是影响钢材 FATT50 的因素之一[121]。一些研究表明,随着退火时间的增加,钢材的晶粒尺寸会逐渐增大,从而导致 FATT50 的降低。因此,在进行退火处理时,也需要确定适当的退火时间。总的来说,钢材的退火热处理对 FATT50 的影响是复杂的,需要综合考虑多个因素。

### 2.3.2 淬火

在淬火过程中,快速冷却可以提高材料的 FATT50。这是因为淬火可以使晶粒细化,并消除缺陷,从而提高材料的冲击韧性[122, 123]。然而,如果淬火过程过于剧烈,会导致内部应力过大,从而导致材料的 FATT50 降低。研究表明,在钢铁材料中,采用中等速率冷却可以提高其 FATT50。中等速率冷却是指将加热处理的材料放置在空气中自然冷却,而不是采用快速冷却的方法。中等速率冷却可以使材料组织更加细小和均匀,从而提高其冲击韧性。同时,采用中等速率冷却还可以避免由于过快冷却引起的材料变形和裂纹等问题,提高热处理工艺的可控性和稳定性。此外,在钢铁材料中,还有一种称为“间歇冷却”的热处理工艺。间歇冷却是指将材料加热到一定温度,然后迅速将其浸入水中或其他冷却介质中。研究表明,采用间歇冷却可以使钢铁材料的晶粒更加细小和均匀,从而提高其冲击韧性。但是,间歇冷却也会引起材料的变形和裂纹等问题,需要在实际应用中慎重考虑。因此,在淬火过程中,需要根据材料的性质和工艺要求,合理选择冷却速率,以达到最佳的 FATT50。

### 2.3.3 正火

钢材正火热处理是指将钢材加热到适当温度,然

后保持一定时间,最后以适当速度冷却至室温的热处理工艺。正火热处理是钢材生产和加工过程中常用的一种热处理方法,它可以改善钢的机械性能和物理性能,包括提高钢的硬度、强度、韧性和耐磨性等[124]。但是,正火热处理对钢材的 FATT50 也有一定的影响。研究表明,正火热处理可以提高钢材的 FATT50。正火热处理可以促进钢材中碳、硫等元素的析出和扩散,从而使钢材中的碳化物、硫化物等夹杂物得到有效控制,减少夹杂物对钢材的影响。此外,正火热处理还可以使钢材的晶体结构得到优化和稳定,减少晶界缺陷和夹杂物的形成,从而提高钢材的 FATT50。然而,正火热处理的过程和参数也会对钢材的 FATT50 产生影响。研究表明,正火热处理温度和保温时间的选择对钢材的 FATT50 有重要影响。过高或过低的温度和时间都会降低钢材的 FATT50 [124]。因此,在正火热处理中需要选择合适的温度和时间参数,以达到最佳的 FATT50 提高效果。

### 2.3.4 回火

回火也是影响 FATT50 的重要因素之一。钢材回火热处理是钢材正火后的一种热处理方式,通常是在高温下进行加热,然后在空气或其他介质中冷却。这个过程可以消除正火产生的内应力,并使钢材获得更好的韧性和可加工性。回火过程也会影响钢材的 FATT50。一般来说,回火温度越高,钢材的强度和硬度就越低,但韧性和 FATT50 也会相应提高。这是因为高回火温度会导致位错排列更加松散,晶体结构更加均匀,从而降低内部应力,增加材料的可塑性和韧性。然而,回火温度过高会导致晶界粗化、夹杂物析出等不良影响,从而降低 FATT50 [122, 125, 126]。因此,选择合适的回火温度和时间非常重要,以平衡钢材的强度、硬度和韧性之间的关系,同时保证 FATT50 的性能。

总之,热处理工艺对材料的 FATT50 有着重要的影响。选择适当的热处理工艺可以提高材料的冲击韧性,从而提高其使用寿命和安全性能[65, 73, 86, 123-131]。

## 3 结论与展望

本文以 FATT50 为研究对象,对国内外 FATT50 评定标准进行了综述,并深入分析了 FATT50 与材料的微观结构、化学成分以及热处理工艺等因素之间的关系。研究发现,FATT50 受到这些因素的综合影响,其中微

观结构的变化可能导致金属在低温下的脆性增加。化学成分中特别是碳含量对 FATT50 有显著影响, 高碳含量可加剧金属的低温脆性。此外, 热处理工艺的选择也对 FATT50 产生显著影响, 通过调整温度和时间, 可以有效改善或恶化金属在低温下的性能。因此, 对 FATT50 的深入研究和有效应用对于确保材料在极端条件下的稳定性和可靠性具有至关重要的意义。这一研究不仅有助于提高材料设计的准确性, 还对各个行业的工程实践和科研发展起到推动作用。

未来, 随着科技的不断发展和工程领域的不断拓展, 对材料性能的要求将变得更为严苛。在这一背景下, FATT50 的研究和应用将更加迫切。预计未来的研究方向将主要集中在以下几个方面:

- (1) 随着新型材料的涌现, 对 FATT50 的评估标准需要不断更新和拓展, 以适应更多种类、更复杂结构的材料。对于一些新兴领域, 如先进制造、能源储存等, 我们需要更加精准的 FATT50 评估方法, 以确保材料在极端环境下的可靠性和稳定性。
- (2) 随着大数据和人工智能技术的不断成熟和完善, 借助这些技术对大量实验数据进行分析的能力会得到迅速的提高, 深化对 FATT50 影响因素的理解, 提高预测模型的准确性。这将为材料设计和优化提供更为高效的手段。
- (3) 跨学科合作将变得更为重要。FATT50 的研究涉及到材料科学、机械工程、化学等多个领域, 未来的研究将更加注重不同学科之间的交叉融合, 通过综合各方面的知识, 全面提升对 FATT50 及其影响因素的认识。

总之, 对 FATT50 的深入研究不仅对材料科学领域具有重要意义, 同时对推动工程技术的发展和提高新材料在实际应用中的性能将产生深远的影响。

## 致谢

本文为四川六合特种金属材料股份有限公司金属材料韧脆转变研究的阶段性成果之一。

## 参考文献

- [1] Wang H, Sun Y, Qiao B J, Chen X F. Crack propagation mechanism of titanium nano-bicrystal: a molecular dynamics study [J]. *European Physical Journal B*, 2021, 94(9): 194.
- [2] Smith D. Exploring the myth: The sinking of the Titanic [J]. *Industrial & Environmental Crisis Quarterly*, 1994, 8(3): 275-288.
- [3] Radke B, Jewell L, Piketh S, Namieśnik J. Arsenic-based warfare agents: production, use, and destruction [J]. *Critical reviews in environmental science and technology*, 2014, 44(14): 1525-1576.
- [4] Brostow W, Lobland H E H, Khoja S. Brittleness and toughness of polymers and other materials [J]. *Materials Letters*, 2015, 159: 478-480.
- [5] Brostow W, Hagg Lobland H E. Brittleness of materials: implications for composites and a relation to impact strength [J]. *Journal of Materials Science*, 2010, 45: 242-250.
- [6] Perianes-Rodriguez A, Waltman L, Van Eck N J. Constructing bibliometric networks: A comparison between full and fractional counting [J]. *Journal of informetrics*, 2016, 10(4): 1178-1195.
- [7] Yang J, Li F S, Guan C, Xu X M, Zhong L, Gao Y B, Han Y Y, Yan N, Zhao G Y, Jiang W. Brittle-ductile transition of impact PP blends: effect of modulus ratio of PP matrix to impact modifier [J]. *Polymer Bulletin*, 2023, 80(4): 4459-4471.
- [8] Wu B Y, Li Y N, Yang J M, Zhou Y G. Mechanism of Low-Temperature Brittle-Ductile Transition of Polypropylene/Low-Density Polyethylene Blend Foam under Compressive Stress Caused by Cell Stretching [J]. *Advanced Engineering Materials*, 2023, 25(16): 2300533.
- [9] Wang P, Zhou D X, Zhao H R, Lin Y C, Nie A M, Wang H T. Dislocation-mediated brittle-ductile transition of diamond under high pressure [J]. *Diamond and Related Materials*, 2023, 138: 110198.
- [10] Thom C A, Hansen L N, Goldsby D L, Brodsky E E. A Microphysical Model of Rock Friction and the Brittle-Ductile Transition Controlled by Dislocation Glide and Backstress Evolution [J]. *Journal of Geophysical Research-Solid Earth*, 2023, 128(2): e2022JB024150.
- [11] Dragoni M, Pondrelli S. Depth of the Brittle-Ductile Transition in a Transcurrent Boundary Zone [J]. *Pure and Applied Geophysics*, 1991, 135(3): 447-461.
- [12] Prediction of the Shift in the Brittle-Ductile Transition-Temperature of Light-Water Reactor (Lwr) Pressure-Vessel Materials [J]. *Journal of Testing and Evaluation*, 1983, 11(4): 237-260.
- [13] Murray G T. Brittle-Ductile Transition Temperatures in Ionic Crystals [J]. *Journal of the American Ceramic Society*, 1960, 43(6): 330-334.

- [14] Saidi F, Mokhdar S, Dergal M, Mahmoudi A, Kallekh A, Abd El-Gawad H H. Ab initio study of the structural, electronic, magnetic, mechanical, optical, and dynamical properties of the rare-earth dihydrides MH<sub>2</sub> (M= Yb, Sc, Eu, Y, Lu and Gd) [J]. Vacuum, 2023, 212: 112011.
- [15] Maggini M, Russo D, Caputo R. A 3D rheological model for the Aegean Region: Mechanical layering and seismotectonic implications [J]. Journal of Structural Geology, 2023, 175: 104956.
- [16] Jia R, Fu X F, Jin Y J, Wu T, Wang S, Cheng H J. Mechanical properties of mudstone caprock and influencing factors: implications for evaluation of caprock integrity [J]. Frontiers in Earth Science, 2023, 11: 1229851.
- [17] Hu X J, Hu H B, Xie N, Huang Y J, Guo P P, Gong X N. The Effect of Grain Size Heterogeneity on Mechanical and Microcracking Behavior of Pre-heated Lac du Bonnet Granite Using a Grain-Based Model [J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 2023, 56(8): 5923-5954.
- [18] Huang W H, Zhong H G, Lei L P, Fang G. Microstructure and mechanical properties of multi-pass forged and annealed 42CrMo steel [J]. Materials Science and Engineering a-Structural Materials Properties Microstructure and Processing, 2022, 831: 142191.
- [19] Evans B, Dresen G. Deformation of Earth Materials - 6 Easy Pieces [J]. Reviews of Geophysics, 1991, 29: 823-843.
- [20] Imaev R M, Gabdullin N K, Salishchev G A. Effect of Deformation Temperature on Mechanical-Properties and Microstructure Intermetallic Compound Ti3Al [J]. Russian Metallurgy, 1992, (6): 68-74.
- [21] Shea W T, Kronenberg A K. Rheology and Deformation Mechanisms of an Isotropic Mica Schist [J]. Journal of Geophysical Research-Solid Earth, 1992, 97(B11): 15201-15237.
- [22] Yang W, Peng K Y, Zhang L F, Ren Q. Deformation and fracture of non-metallic inclusions in steel at different temperatures [J]. Journal of Materials Research and Technology-Jmr&T, 2020, 9(6): 15016-15022.
- [23] Rybacki E, Niu L, Evans B. Semi-Brittle Deformation of Carrara Marble: Hardening and Twinning Induced Plasticity [J]. Journal of Geophysical Research-Solid Earth, 2021, 126(12): e2021JB022573.
- [24] Zhang X L, He J X, Ren Z Q, Zhou T T, Cao W J, Xu B. Analysis of the Submicrostructural Deformation of Amphibole in a Ductile Shear Zone Based on the TEM Technique [J]. Journal of Nanoscience and Nanotechnology, 2021, 21(1): 765-771.
- [25] Scofield G D, Hwang S, Caccia M, Chamberlain A L, Kush M T, Sangid M D, Sandhage K H. Fracture behavior of a melt-infiltration-processed SiC/Si composite at 900 °C in argon, air, and steam [J]. Journal of the European Ceramic Society, 2023, 43(2): 224-234.
- [26] Roy D G, Singh T N. Effect of heat-treatment on the pure- and mixed-mode fracture properties of a homogeneous sandstone [J]. Geomechanics for Energy and the Environment, 2023, 33: 100430.
- [27] Fujimoto K, Ishikawa H, Tang Z Y, Okazaki S. All-atom molecular dynamics study of the impact fracture of glassy polymers. III: Compressive fracture of PC and PMMA [J]. Polymer, 2023, 283: 126276.
- [28] Yao C B, Xia Y, Zhu Z M, Yang Z R, Chen K, Jiang H. Investigation on brittle-ductile transition of PMMA mode-II fracture using time-temperature superposition principle [J]. Engineering Fracture Mechanics, 2022, 273: 108733.
- [29] Wu Q, Cao K, Sun Y, Li C, Yang L, Zhou Y. Temperature-dependent fracture behaviour of superstructure Hf6Ta2O17 from ambient temperature to 1600 °C [J]. Ceramics International, 2022, 48(21): 31461-31469.
- [30] Sreedhar S A, Baruah D, Shankar G, Suwas S, Narasimhan R. Temperature dependence of mode I fracture behaviour of a textured magnesium alloy [J]. International Journal of Fracture, 2022, 238(2): 89-114.
- [31] Bao S H, Zhu L H, Wang H B, Luo H L, Chen F, Yu W W, Zhang Z Y, Zhuang X W, Wu Q, Shanguan Y G, Zheng Q. Synergistic effect of compound rubber and SiO<sub>2</sub> nanoparticles on low-temperature toughening and balanced stiffness-toughness of random copolymer polypropylene nanocomposites [J]. Composites Science and Technology, 2023, 242: 110210.
- [32] Wang X F, Jia Y, Zhang J, Chen H. Excellent toughness of rigid polyvinylchloride at low temperature improved by polycarbonate-polydimethylsiloxane block copolymer [J]. Journal of Applied Polymer Science, 2022, 139(46): 53159.
- [33] Guo S H, Luo G J, Niu Y H, Li G X. Preparation of High Strength and Super Toughness PBT/Copolyester Alloy [J]. Acta Polymerica Sinica, 2022, 53(12): 1504-1513.
- [34] Langer J S. Fracture toughness of crystalline solids [J]. Physical Review E, 2021, 103(6): 063004.
- [35] Dennis J M, Krishnamurthy A, Sirk T W, Patterson B A, Busch C E, Lenhart J L, Knorr D K. Bridging Strength and Ductility in Crosslinked Epoxy Networks [J]. Acs Applied Polymer Materials, 2023, 5(7): 5082-5091.
- [36] Piceda C R, Scheck-Wenderoth M, Cacace M, Bott J, Strecker M R. Long-Term Lithospheric Strength and Upper-Plate Seismicity in the Southern Central Andes, 29°-39°S [J]. Geochemistry Geophysics Geosystems, 2022, 23(3): e2021GC010171.



- [37] Ren Y Q, Sun X J, Chen L L, Li Y F, Sun M M, Duan X L, Liang W B. Structures and impact strength variation of chemically crosslinked high-density polyethylene: effect of crosslinking density [J]. *Rsc Advances*, 2021, 11(12): 6791-6797.
- [38] Mizera M, Little T, Boulton C, Katzir Y, Thiagarajan N, Prior D J, Biemiller J, Smith E G C. Using Syntectonic Calcite Veins to Reconstruct the Strength Evolution of an Active Low-Angle Normal Fault, Woodlark Rift, SE Papua New Guinea [J]. *Journal of Geophysical Research-Solid Earth*, 2021, 126(8): e2021JB021916.
- [39] Li C N, Duan R, Fu W, Gao H S, Wang D P, Di X J. Improvement of mechanical properties for low carbon ultra-high strength steel strengthened by Cu-rich multistructured precipitation via modification to bainite [J]. *Materials Science and Engineering a-Structural Materials Properties Microstructure and Processing*, 2021, 817: 141337.
- [40] Yin Z K, Chen J S, Zhang P L, Yu Z S, Zhang Y Z, Chun Y, Lu H. Phase stability, brittle-ductile transition, and electronic structures of the TiAl alloying with Fe, Ru, Ge, and Sn: a first-principle investigation [J]. *Journal of Molecular Modeling*, 2020, 26(11): 320.
- [41] Zhang L Y, Mao X B, Li M, Li B, Liu R X, Lu A H. Brittle-Ductile Transition of Mudstone in Coal Measure Rock Strata under High Temperature [J]. *International Journal of Geomechanics*, 2020, 20(1): 0001549.
- [42] Zhao G Q, Gomes F P C, Marway H, Thompson M R, Zhu Z R. Physical Aging as the Driving Force for Brittle-Ductile Transition of Polylactic Acid [J]. *Macromolecular Chemistry and Physics*, 2020, 221(3): 201900475.
- [43] Baud P, Hall S, Heap M J, Ji Y T, Wong T F. The Brittle-Ductile Transition in Porous Limestone: Failure Mode, Constitutive Modeling of Inelastic Deformation and Strain Localization [J]. *Journal of Geophysical Research-Solid Earth*, 2021, 126(5): e2020JB021602.
- [44] Gerberich W W, Schmalbach K M, Chen Y X, Hintsala E, Mara N A. Quantifying physical parameters to predict brittle/ductile behavior [J]. *Materials Science and Engineering a-Structural Materials Properties Microstructure and Processing*, 2021, 808: 140899.
- [45] Gerya T V, Bercovici D, Becker T W. Dynamic slab segmentation due to brittle-ductile damage in the outer rise [J]. *Nature*, 2021, 599(7884): 245-250.
- [46] Michot G, George A. Fracture and Crack Tip Plasticity in Silicon and Gallium-Arsenide [J]. *Institute of Physics Conference Series*, 1989, (104): 385-396.
- [47] Liu J L, Weber K, Walter J. Fluid flow and low temperature plasticity of marble in the upper crustal level. [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2000, 16(4): 499-505.
- [48] Brunner D, Taeri-Baghdarani S, Sigle W, Rühle M. Surprising results of a study on the plasticity in strontium titanate [J]. *Journal of the American Ceramic Society*, 2001, 84(5): 1161-1163.
- [49] Han X D, Zhang Y F, Zheng K, Zhang X N, Zhang Z, Hao Y J, Guo X Y, Yuan J, Wang Z L. Low-temperature in situ large strain plasticity of ceramic SiC nanowires and its atomic-scale mechanism [J]. *Nano Letters*, 2007, 7(2): 452-457.
- [50] Han X D, Zheng K, Zhang Y F, Zhang X N, Zhang Z, Wang Z L. Low-temperature in situ large-strain plasticity of silicon nanowires [J]. *Advanced Materials*, 2007, 19(16): 2112-2118.
- [51] Chen M, Wehrs J, Sologubenko A S, Rabier J, Michler J, Wheeler J M. Size-dependent plasticity and activation parameters of lithographically-produced silicon micropillars [J]. *Materials & Design*, 2020, 189: 108506.
- [52] Li Q Y, Xu C B, Luo Z C, Huang F H, Zang X S, Zhang D C. Fatigue performance of Q420C steel fillet-welded joints at low temperatures [J]. *Structures*, 2023, 51: 1341-1353.
- [53] Amara M, Pluvinaige G, Hadj-Meliani M. Influence of hydrogen embrittlement on mechanical properties of pipe steels [J]. *Nauka I Tehnologii Truboprovodnogo Transporta Nefti I Nefteproduktov-Science & Technologies-Oil and Oil Products Pipeline Transportation*, 2022, 12(6): 519-529.
- [54] Shin G, Kajitani T, Suzuki T, Umeda T. Mechanical-Properties of Carbon-Steels during Solidification [J]. *Tetsu to Hagane-Journal of the Iron and Steel Institute of Japan*, 1992, 78(4): 587-593.
- [55] Tahmouh F G, Grant N J, Abrahamson E P. Effect of Grain Size on Brittle-Ductile Transition Temperature of Pure Iron and Some Dilute Iron-Tungsten Alloys [J]. *Transactions of the Metallurgical Society of Aime*, 1963, 227(2): 505.
- [56] Smiti E, Jouffrey P, Kobylanski A. The Influence of Carbon and Oxygen in the Grain-Boundary on the Brittle-Ductile Transition-Temperature of Tungsten Bi-Crystals [J]. *Scripta Metallurgica*, 1984, 18(7): 673-676.
- [57] Mutoh Y, Ichikawa K, Nagata K, Takeuchi M. Effect of Rhenium Addition on Fracture-Toughness of Tungsten at Elevated-Temperatures [J]. *Journal of Materials Science*, 1995, 30(3): 770-775.
- [58] Song G M, Bai H S, Yu Z, Wang Y J. Elevated temperature fracture behavior of ZrC particle-reinforced tungsten matrix composite [J]. *Rare Metal Materials and Engineering*, 2000, 29(2): 101-104.
- [59] Reiser J, Rieth M, Dafferner B, Hoffmann A. Tungsten foil laminate for structural divertor applications - Basics and outlook [J]. *Journal of Nuclear Materials*, 2012, 423(1-3): 1-8.

- [60] Arakcheev A S, Skovorodin D I, Burdakov A V, Shoshin A A, Polosatkin S V, Vasilyev A A, Postupaev V V, Vyacheslavov L N, Kasatov A A, Huber A, Mertens P, Wirtz M, Linsmeier C, Kreter A, Löwenhoff T, Begrambekov L, Grunin A, Sadoyskiy Y. Calculation of cracking under pulsed heat loads in tungsten manufactured according to ITER specifications [J]. *Journal of Nuclear Materials*, 2015, 467: 165-171.
- [61] Ast J, Schwiedrzik J J, Wehrs J, Frey D, Polyakov M N, Michler J, Maeder X. The brittle-ductile transition of tungsten single crystals at the micro-scale [J]. *Materials & Design*, 2018, 152: 168-180.
- [62] Li D Z, Zhang X D, Chen J Y, Liu Y, Wang F. The mechanism of elastic and electronic properties of Tungsten Silicide (5/3) with vacancy defect from the first-principles calculations [J]. *Vacuum*, 2020, 174: 109192.
- [63] Shah V, van Dommelen J A W, Altstadt E, Das A, Geers M G D. Brittle-ductile transition temperature of recrystallized tungsten following exposure to fusion relevant cyclic high heat load [J]. *Journal of Nuclear Materials*, 2020, 541: 152416.
- [64] Lepov V, Arkhanel'skaja E, Achikaso'va V. Kinetics of brittle fracture in metals under the influence of hydrogen [J]. 1st International Conference on Integrity and Lifetime in Extreme Environment (Ilee-2019), 2019, 20: 24-29.
- [65] Tanaka M, Takano S, Higashida K. Enhancement of Low Temperature Toughness in Bulk Nanostructured Metals [J]. *Materials Transactions*, 2013, 54(9): 1624-1628.
- [66] Terentyev D, Zhurkin E E, Bonny G. Emission of full and partial dislocations from a crack in BCC and FCC metals: An atomistic study [J]. *Computational Materials Science*, 2012, 55: 313-321.
- [67] Malygin G A. Analysis of the parameters of a brittle-ductile transition during impact loading of neutron-irradiated BCC metals and alloys [J]. *Physics of the Solid State*, 2006, 48(9): 1716-1723.
- [68] Xing X S. A statistical theory of transgranular brittle fracture for metals [J]. *Acta Physica Sinica*, 1999, 48(1): 107-113.
- [69] Osipov O D. Search of correlation restraints between parameters of effective potential and mechanical characteristics of refractory metals and their silicides [J]. *Metallifizika i Noveishie Tekhnologii*, 1999, 21(4): 76-79.
- [70] Devincre B, Roberts S G. Three-dimensional simulation of dislocation-crack interactions in BCC metals at the mesoscopic scale [J]. *Acta Materialia*, 1996, 44(7): 2891-2900.
- [71] Issa I, Gammer C, Kolitsch S, Hohenwarter A, Imrich P J, Pippan R, Kiener D. TEM investigation of toughening in Silicon at small scales [J]. *Materials Today*, 2021, 48: 29-37.
- [72] Brochard S, El Nabi F A, Pizzagalli L, Merabet A, Texier M, Tromas C, Godet J. Atomic scale mechanisms and brittle to ductile transition at low size in silicon [J]. *Materials Today-Proceedings*, 2018, 5(6): 14693-14704.
- [73] Abdulkadir L N, Abou-El-Hossein K, Jumare A I, Liman M M, Olaniyan T A, Odedeyi P B. Review of molecular dynamics/experimental study of diamond-silicon behavior in nanoscale machining [J]. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2018, 98(1-4): 317-371.
- [74] Zhu B, Zhao D, Zhao H W, Guan J, Hou P L, Wang S B, Qian L. A study on the surface quality and brittle-ductile transition during the elliptical vibration-assisted nanocutting process on monocrystalline silicon molecular dynamic simulations [J]. *Rsc Advances*, 2017, 7(7): 4179-4189.
- [75] Uesugi A, Hirai Y, Tsuchiya T, Tabata O. Effect of Crystallographic Orientations on Fractures and Slip Occurrences at 500 °C of (110) Single Crystal Silicon Microstructures [J]. 21st European Conference on Fracture, (Ecf21), 2016, 2: 1413-1420.
- [76] Jaya B N, Wheeler J M, Wehrs J, Best J P, Soler R, Michler J, Kirchlechner C, Dehm G. Microscale Fracture Behavior of Single Crystal Silicon Beams at Elevated Temperatures [J]. *Nano Letters*, 2016, 16(12): 7597-7603.
- [77] Uesugi A, Hirai Y, Tsuchiya T, Tabata O. Size Effect on Brittle-Ductile Transition Temperature of Silicon by Means of Tensile Testing [J]. 2015 28th IEEE International Conference on Micro Electro Mechanical Systems (MEMS 2015), 2015: 389-392.
- [78] Olufayo O A, Abou-El-Hossein K. Molecular dynamics modeling of nanoscale machining of silicon [J]. 14th CIRP Conference on Modeling of Machining Operations (CIRP CMMO), 2013, 8: 504-509.
- [79] Masolin A, Bouchard P O, Martini R, Bernacki M. Thermo-mechanical and fracture properties in single-crystal silicon [J]. *Journal of Materials Science*, 2013, 48(3): 979-988.
- [80] Hirsch P B, Roberts S G. The Brittle Ductile Transition in Silicon [J]. *Philosophical Magazine a-Physics of Condensed Matter Structure Defects and Mechanical Properties*, 1991, 64(1): 55-80.
- [81] Haasen P. Brittle-to-Ductile Transition in Silicon as a Model for Intermetallics [J]. *Materials Science and Engineering a-Structural Materials Properties Microstructure and Processing*, 1991, 137: 105-110.
- [82] Lei R D, Wang Y, Zhang L, Liu B L, Long K, Luo P, Wang Y K. The evolution of sandstone microstructure and mechanical properties with thermal damage [J]. *Energy Science & Engineering*, 2019, 7(6): 3058-3075.

- [83] Lapin J, Pelachova T, Bajana O. High temperature deformation behaviour and microstructure of cast in-situ TiAl matrix composite reinforced with carbide particles [J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2019, 797: 754-765.
- [84] Pallaspuo S, Kaijalainen A, Mehtonen S, Kömi J, Zhang Z L, Porter D. Effect of microstructure on the impact toughness transition temperature of direct-quenched steels [J]. *Materials Science and Engineering a-Structural Materials Properties Microstructure and Processing*, 2018, 712: 671-680.
- [85] Lepov V, Grigoriev A, Bisong M, Achikasova V, Lepova K, Ivanova A, Balakleiskii N, Loginov B, Loginov A. Microstructure Analyses and Multiscale Stochastic Modeling of Steel Structures Operated in Extreme Environment [J]. *Ecf22 - Loading and Environmental Effects on Structural Integrity*, 2018, 13: 1201-1208.
- [86] Todai M, Nakano T, Liu T Q, Yasuda H Y, Hagihara K, Cho K, Ueda M, Takeyama M. Effect of building direction on the microstructure and tensile properties of Ti-48Al-2Cr-2Nb alloy additively manufactured by electron beam melting [J]. *Additive Manufacturing*, 2017, 13: 61-70.
- [87] Mi D S, Liu H, Zhang L, Wang T, Zhang X W, Zhang J. The Changes of Microstructure and Physical Properties of Isotactic Polypropylene/ $\beta$  Nucleation Agent/Polyolefin Elastomer Induced by Annealing Following Processing [J]. *Journal of Macromolecular Science Part B-Physics*, 2015, 54(11): 1376-1390.
- [88] Wheeler J M, Thilly L, Zou Y, Morel A, Raghavan R, Michler J. The effect of dislocation nature on the size effect in Indium Antimonide above and below the brittle-ductile transition [J]. *Mrs Advances*, 2020, 5(33-34): 1811-1818.
- [89] Kuroyanagi S, Shinoda K, Yumoto A, Akedo J. Size-dependent quasi Brittle-Ductile transition of single crystalline alpha-alumina particles during microcompression tests [J]. *Acta Materialia*, 2020, 195: 588-596.
- [90] Wang R Z, Li D Y, Wang X R, Li W G. Temperature dependent fracture toughness of the particulate-reinforced ultra-high-temperature-ceramics considering effects of change in critical flaw size and plastic power [J]. *Composites Part B-Engineering*, 2019, 158: 28-33.
- [91] Guzzo P L, de Barros F B M, Tino A A D. Effect of prolonged dry grinding on size distribution, crystal structure and thermal decomposition of ultrafine particles of dolostone [J]. *Powder Technology*, 2019, 342: 141-148.
- [92] Lukács N, Decsov K E, Molnár B, Ronkay F, Bocz K B. Increased processing temperature assisted reactive toughening of poly (lactic acid) [J]. *Express Polymer Letters*, 2023, 17(2): 169-180.
- [93] Yang B L, Song B, Zhang C, Chen S H. Temperature-dependent brittle-ductile transition of  $\alpha$ -graphyne nanoscroll and its micromechanism [J]. *Carbon*, 2022, 191: 98-105.
- [94] Pajang S, Le Pourhiet L, Cubas N. The topographic signature of temperature-controlled rheological transitions in an accretionary prism [J]. *Solid Earth*, 2022, 13(3): 535-551.
- [95] Calcagnotto M, Ponge D, Raabe D. Effect of grain refinement to 1  $\mu$ m on strength and toughness of dual-phase steels [J]. *Materials Science and Engineering: A*, 2010, 527(29-30): 7832-7840.
- [96] Steller I, Blaes N, Kocdemir B, Brandenburger J. New standardized method for determining the brittle-ductile transition temperature [J]. *Stahl Und Eisen*, 2011, 131(2): 55-58.
- [97] Węgrzyn T, Piwnik J, Łazarz B, Hadryś D, Wiszała R. Parameters of welding with micro-jet cooling [J]. *Archives of Materials Science and Engineering*, 2012, 54(2): 86-92.
- [98] de Koning M, Antonelli A, Bazant M Z, Kaxiras E, Justo J F. Finite-temperature molecular-dynamics study of unstable stacking fault free energies in silicon [J]. *Physical Review B*, 1998, 58(19): 12555-12558.
- [99] Pantazopoulos G A, Toulfatzis A I. Fracture modes and mechanical characteristics of machinable brass rods [J]. *Metallography, Microstructure, and Analysis*, 2012, 1: 106-114.
- [100] Ferreirós P A, Alonso P R, Rubiolo G H. Innovative method of impact testing in high temperatures applied in carbon steels [J]. *Materia-Rio De Janeiro*, 2018, 23(2): e-12067.
- [101] Okayama Y, Kawazoe F, Yasui H, Umeki S, Hara K, Kato H, Ueshima Y, Hoshino M. Production of high quality extra heavy plates with new casting equipment [J]. *Shinnittetsu Giho*, 2004: 50-56.
- [102] Lucon E. Material damage evaluation and residual life assessment of primary power plant components using specimens of non-standard dimensions [J]. *Materials Science and Technology*, 2001, 17(7): 777-785.
- [103] Li H, Wang X, Li B, Zhao J, Sheng J. Failure Mechanism Analysis of L245M Oil and Gas Pipeline in an Oil Field [J]. *Integrated Ferroelectrics*, 2023, 236(1): 164-173.
- [104] Ji N, Zhang B, Wu Z, Feng C, Wang P, Zhu L. Fracture Failure Analysis of a Top Drive Side Cover Joint [J]. *Journal of Failure Analysis and Prevention*, 2023: 1-9.
- [105] Zhai J-m, Shang X-x, Kong L-c, Song M, Wang H-k, Xu T, Yu H-y, Sun Y-h. Fatigue Failure Analysis of Pump Shaft of a Hydraulic Coke Removal System [J]. *Journal of Failure Analysis and Prevention*, 2021, 21: 861-869.
- [106] Yun F, Zhao X, Liu C, Liu J. Analysis and Research on Fracture Cause of Fixed Shaft of Torsion Arm of Wind Turbine Gearbox, *Journal of Physics: Conference Series*, IOP Publishing, 2021, p. 012039.



- [107] Yun F, Zhao X, Liu C, Liu J, Fracture Analysis of high strength bolt in wind turbine, *Journal of Physics: Conference Series*, IOP Publishing, 2021, p. 012028.
- [108] Safarov I M, Korznikov A V, Sergeev S N, Gladkovskii S V, Borodin E M. Effect of submicrocrystalline state on strength and impact toughness of low-carbon 12GBA steel [J]. *Physics of Metals and Metallography*, 2012, 113(10): 1001-1006.
- [109] Mishnev R, Dudova N, Kaibyshev R, Belyakov A. On the Fracture Behavior of a Creep Resistant 10% Cr Steel with High Boron and Low Nitrogen Contents at Low Temperatures [J]. *Materials*, 2020, 13(1): ma13010003.
- [110] Heo N H, Hong C, Heo Y U, Kang M H, Yoo K B, Kim S J. Dependence of Elevated Temperature Intergranular Cracking on Grain Size and Bulk Sulfur Content in TP347H Austenitic Stainless Steels [J]. *Isij International*, 2016, 56(6): 1091-1096.
- [111] Heo N H. Surface segregation kinetics of sulfur influenced by various conditions in thin-gauged 3% Si-Fe alloy strips [J]. *Scripta Materialia*, 2005, 52(5): 409-413.
- [112] Mega T, Shimomura J, Yasuhara E. Grain-Boundary Segregation of Phosphorus and Boron in Extra-Low Carbon-Steels [J]. *Materials Transactions Jim*, 1995, 36(10): 1206-1213.
- [113] Mega T, Shimomura J, Seto K. Grain boundary segregation of phosphorus, boron and manganese in high tensile strength steel sheet [J]. *Materials Transactions Jim*, 1996, 37(3): 323-329.
- [114] Chen R, Yeun W. Review of the high-temperature oxidation of iron and carbon steels in air or oxygen [J]. *Oxidation of metals*, 2003, 59(5-6): 433-468.
- [115] Liao C-M, Lee J-L. Effect of molybdenum on sulfide stress cracking resistance of low-alloy steels [J]. *Corrosion*, 1994, 50(09): NACE-94090695.
- [116] Dewangan A, Patel A, Bhadania A. Stainless steel for dairy and food industry: a review [J]. *J. Mater. Sci. Eng*, 2015, 4(5): 1-4.
- [117] Natesan K, Kassner T. Thermodynamics of carbon in nickel, iron-nickel and iron-chromium-nickel alloys [J]. *Metallurgical Transactions*, 1973, 4: 2557-2566.
- [118] Michal G M, Slane J A. The kinetics of carbide precipitation in silicon-aluminum steels [J]. *Metallurgical Transactions A*, 1986, 17: 1287-1294.
- [119] Han Q, Zhang X, Chen D, Wang P. The calcium-phosphorus and the simultaneous calcium-oxygen and calcium-sulfur equilibria in liquid iron [J]. *Metallurgical Transactions B*, 1988, 19: 617-622.
- [120] Modak P, Ghosh A, Rarhi N, Kumar V, Balamuralikrishnan R, Chakrabarti D. A review on the effect of microstructure, texture and inclusion on Charpy impact transition behaviour of low-carbon ferritic steels [J]. *Met. News*, 2016, 19: 21-34.
- [121] Lee C S, Chai K H, Na J G, Yoon S K, Heo N H. Effect of annealing atmosphere on surface-energy-induced selective grain growth in thin-gauged 3% Si-Fe strip [J]. *Textures of Materials*, Pts 1 and 2, 2002, 408-4: 1281-1286.
- [122] Tyumentsev A N, Chernov V M, Leont'eva-Smirnova M V, Astafurova E G, Shevyako N A, Litovchenko I Y. Microstructure of EK-181 ferritic-martensitic steel after heat treatment under various conditions [J]. *Technical Physics*, 2012, 57(1): 48-54.
- [123] Lavella M, Botto D. Fretting wear of alloy steels at the blade tip of steam turbines [J]. *Wear*, 2019, 426: 735-740.
- [124] Boyce B L, Grazier J M, Buchheit T E, Shaw M J. Strength distributions in polycrystalline silicon MEMS [J]. *Journal of Microelectromechanical Systems*, 2007, 16(2): 179-190.
- [125] Peyre P, Sabatier L, Aubert P, Fabbro R. Pulsed and CWYAG laser welding of F82H desactivated steel for nuclear applications [J]. *Icaleo (R) 2000: Proceedings of the Laser Materials Processing Conference*, Vol 89, 2000, 89: C203-C209.
- [126] Dzioba I, Pala R, Kasinska J. Experimental – Numerical Analysis of Stress State in Front of the Crack Tip of Modified and Unmodified G17CrMo5-5 Cast Steel by Rare Earth Metals in a Brittle-Ductile Transition Region [J]. *Archives of Metallurgy and Materials*, 2016, 61(2): 1175-1181.
- [127] Alam M Z, Srivathsa B, Kamat S V, Jayaram V, Das D K. Study of Brittle-to-ductile-transition in Pt-aluminide bond coat using micro-tensile testing method [J]. *Transactions of the Indian Institute of Metals*, 2011, 64(1-2): 57-61.
- [128] Akedo J. Room temperature impact consolidation and application to ceramic coatings: aerosol deposition method [J]. *Journal of the Ceramic Society of Japan*, 2020, 128(3): 101-116.
- [129] Ohta T, Nakagawa Y, Kaneno Y, Inoue H, Takasugi I T, Kim W Y. Microstructures and mechanical properties of NbCr and ZrCr Laves phase alloys prepared by powder metallurgy [J]. *Journal of Materials Science*, 2003, 38(4): 657-665.
- [130] Heo N H, Chang J C, Kim S J. Elevated temperature intergranular cracking in heat-resistant steels [J]. *Materials Science and Engineering a-Structural Materials Properties Microstructure and Processing*, 2013, 559: 665-677.
- [131] Chamberlain C P, Koons P O, Meltzer A S, Park S K, Craw D, Zeitler P, Poage M A. Overview of hydrothermal activity associated with active orogenesis and metamorphism: Nanga Parbat, Pakistan Himalaya [J]. *American Journal of Science*, 2002, 302(8): 726-748.